

УДК 539.434

Пидгурский Н. И., Барановский В. Н., Ляхов В. В., Пидгурский И. Н.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН, РАЗВИВАЮЩИХСЯ У СВАРНЫХ ШВОВ

Проблема обеспечения долговечности сварных конструкций машин и сооружений на стадии проектирования, прогнозирование остаточной долговечности при их эксплуатации являются актуальными, несмотря на разработанные в последнее время методики их оценки [1–3]. Для прогнозирования долговечности элементов конструкций с концентраторами напряжений, в том числе сварных соединений, наиболее привлекательным является подход, определяющий суммарное количество циклов N до инициирования поверхностной трещины размером (глубиной) a_0 (стадия зарождения трещины с числом циклов N_0), развитие поверхностной трещины до сквозной, а затем распространение сквозной трещины до критического значения l_k (живучесть конструкции, определяемая числом циклов развития трещины N_{mp}):

$$N = N_0 + N_{mp} = N(\sigma_a) + \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C_i(K_{1ПОВ})^{n_i}} + \int_{l_0}^{l_k} \frac{dl}{C_i(K_{1СКВ})^{n_i}}, \quad (1)$$

где σ_a – амплитуда напряжений;

$C_i(K_{1ПОВ})^{n_i}$, $C_i(K_{1СКВ})^{n_i}$ – функции сопротивления разрушению материала сварных швов при развитии поверхностных и сквозных трещин соответственно.

В зонах сварных швов с высокой концентрацией напряжений и возможной технологической дефектностью (подрезы, непровары), рассматривают стадию распространения трещины (живучесть конструкции), пренебрегая стадией зарождения трещины (этот период не превышает 10–20 % общего ресурса конструкций [4]).

Проблемными вопросами при оценке живучести на начальной стадии роста трещин остаются неопределенности по вычислению коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) $K_{1ПОВ}$, связанные с кинетикой формы распространяющихся трещин и зависящие от напряженного состояния в области сварных швов и стохастичности возникновения малых поверхностных трещин и их слияния.

Целью работы является определение коэффициентов интенсивности напряжений для поверхностных трещин, распространяющихся в зонах сварных швов с учетом неоднородного напряженно-деформированного состояния сварных соединений, стохастичности зарождения малых поверхностных трещин.

Отметим, что характерными особенностями сварных соединений с позиций прочности и долговечности являются неоднородность физико-механических свойств материала в зоне сварного соединения, появление после сварки остаточных сварочных напряжений, наличие высокой концентрации напряжений, связанной с конструктивными особенностями и возможными технологическими дефектами, деградация свойств материала в процессе эксплуатации. Приведенные особенности сварных соединений существенно усложняют получение параметров, входящих в формулу (1).

При рассмотрении начальной стадии развития поверхностной трещины, развивающейся в зоне сплавления сварного шва с основным металлом, общие расчетные напряжения определяются конструктивной формой элемента, формой сварного шва, остаточными сварочными напряжениями, возможными дефектами в зоне сварного шва.

Для оценки коэффициентов интенсивности напряжений (КИН), описывающих поле напряжений по контуру поверхностной трещины, распространяющейся в однородном поле напряжений, используют, как правило, уравнения Ньюмена-Райю [5]. При растяжении элемента они имеют вид:

– для наиболее глубокой точки A :

$$K_A = \sigma_n \cdot \sqrt{\pi a} \frac{M}{\Phi}; \quad (2)$$

– в точках фронта трещины, расположенных на поверхности элемента (точки B):

$$K_B = \sigma_n \cdot \sqrt{\pi a} \frac{M \cdot S}{\Phi}, \quad (2')$$

где M , Φ , S – функции параметров полудиагоналей a и c поверхностной трещины и толщины образцов t . Геометрические параметры образцов и трещин представлены на рис. 1.

Влияние конструктивной концентрации напряжений в зоне сварного шва, их распределение по толщине элемента, влияние остаточных сварочных напряжений на оценку КИН определяется модифицированными зависимостями Ньюмена-Райю:

$$K_A = \sigma_n \sqrt{\pi a} \frac{M}{\Phi} \cdot Y_1 + \alpha \cdot K_{r,A}; \quad K_B = \sigma_n \sqrt{\pi a} \frac{MS}{\Phi} \cdot Y_1 + \alpha \cdot K_{r,B}, \quad (3)$$

где $\alpha \cdot K_{r,A}$, $\alpha \cdot K_{r,B}$ – слагаемые, учитывающие влияние растягивающих остаточных сварочных напряжений в наиболее глубокой точке A и на поверхности элемента (точках B) [6];

Y_1 – коэффициент, учитывающий влияние конструктивной концентрации напряжений и их распределение по толщине; определяется зависимостью [7]:

$$Y_1 = A \left(\frac{a}{t} \right)^K, \quad Y_1 > 1. \quad (4)$$

Для точек трещины, лежащих на поверхности образца, коэффициент Y_1 принимается как константа до фиксированной глубины $a = 0,15$ мм.

Для исследованного соединения – крупногабаритных образцов с приваренной накладкой – в работе [7] предложены следующие зависимости:

$$\begin{aligned} A &= 0,8068 - 0,1554 \left(\frac{H}{t} \right) + 0,0429 \left(\frac{H}{t} \right)^2 + 0,0794 \left(\frac{W}{t} \right); \\ K &= -0,1993 - 0,1839 \left(\frac{H}{t} \right) + 0,0495 \left(\frac{H}{t} \right)^2 + 0,0815 \left(\frac{W}{t} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Крупногабаритные модельные элементы (рис. 1) изготавливались из стали 09Г2С, толщиной 16, 20 мм, шириной 120 мм. Накладки приваривались ручной электродуговой сваркой электродами УОНИ-13/55. Испытания проводились на гидропульсаторе ZDM-100 с частотой 8–10 Гц и коэффициентом асимметрии цикла $R_\sigma = 0,2-0,25$. Уровни нагружения составляли $0,45\sigma_{0,2}$ и $0,50\sigma_{0,2}$ ($\sigma_{0,2} = 375$ МПа, $\sigma_s = 534$ МПа, $\psi = 65\%$). Теоретический

коэффициент концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 1,9$. Для сравнения проведено испытание образцов с искусственно нанесенными трещинами, развивающимися в однородном поле напряжений ($\alpha_\sigma = 1,0$) и в тавровом соединении с теоретическим коэффициентом концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 2,0$. Размеры поперечного сечения образцов $80 \times 120 \text{ мм}^2$.

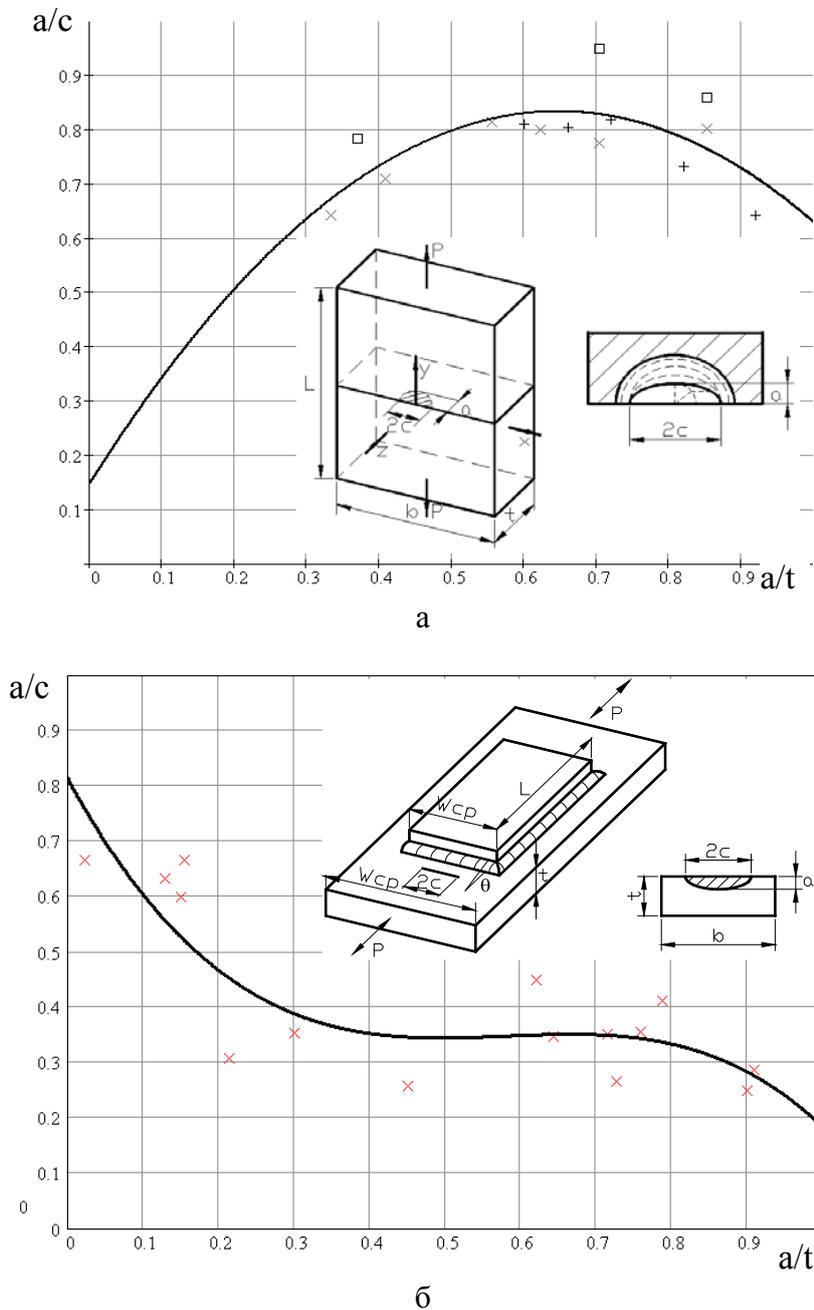


Рис. 1. Кинетика формы поверхностных трещин:

а – в однородном поле напряжений (искусственное инициирование трещины);
 б – у кромки сварного шва (зарождение трещины при циклическом нагружении)

В результате испытаний получена кинетика формы усталостных трещин, существенно влияющая на значения КИН, определяемые по зависимостям (3). Анализ кинетики распространения поверхностных трещин описан в работе [8]. Отметим, что при естественном инициировании трещин, соотношение параметров a/c поверхностной трещины (при $a/t > 0,2$) в $1,8 \div 4,2$ раза меньше по сравнению с трещиной, развивающейся в однородном поле напряжений (рис. 1). Такое существенное отличие формы трещин связано как с особенностями

напряженно-деформированного состояния в зонах концентраторов напряжений, так и стохастическим зарождением и объединением трещин в сварном соединении, причем последний фактор является определяющим.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены аппроксимационные зависимости для описания формы поверхностной полуэллиптической трещины, распространяющейся от инициированного надреза в однородном поле напряжений (рис. 1, а).

$$a/c = 0,148 + 2,121(a/t) - 1,639(a/t)^2; \tag{6}$$

и сварном соединении с угловым швом (рис. 1, б):

$$a/c = 0,813 - 2,51(a/t) + 4,428(a/t)^2 - 2,54(a/t)^3. \tag{7}$$

Используя формулы (1–7), осуществлен расчет КИН для поверхностных трещин, распространяющихся в зоне углового шва в образцах с приваренной накладкой ($\alpha_\sigma = 1,9$) и тавровом соединении ($\alpha_\sigma = 2,0$), а также, для сравнения, определены КИН для поверхностной трещины, распространяющейся в однородном поле напряжений (табл. 1 и табл. 2).

Таблица 1

Значения КИН, полученные в результате испытаний полунатурных образцов с поверхностными трещинами

Образцы	$\sigma_n/\sigma_{0,2}$	R_σ	$l_0 = 2c,$ мм	$l = 2c,$ мм	$\Delta N^D,$ тыс. ц.	$K_{I,A}(l_0)$	$K_{I,A}(l)$	$K_{I,B}(l_0)$	$K_{I,B}(l)$	
						МПа $\sqrt{м}$				
Образцы с приваренной накладкой ($\alpha_\sigma = 1,9$)	№ 1	0,45	0,25	18,0	53,0	213,6	17,81	35,20	17,18	42,50
	№ 2	0,45	0,25	18,2	54,0	242,0	17,86	35,41	17,27	42,78
	№ 3	0,50	0,33	52,0	71,0	135,0	49,00	49,16	42,21	50,88
Тавровое соединение (х-соединение) ($\alpha_\sigma = 2,0$)	№ 1	0,45	0,30	23,5	50	153,0	20,05	33,26	29,68	47,44
	№ 2	0,45	0,30	23,5	45	147,0	20,05	29,57	29,68	44,01
Образцы с $\alpha_\sigma = 1,0$	№ 1	0,50	0,25	14,65	18,6	124,0	19,40	21,70	19,03	21,70
				18,6	24,7	66,0	21,70	26,50	21,70	27,14
	24,7	42,0	45,1	26,50	35,64	27,14	41,05			
№ 2	0,50	0,25	18,8	25,0	72,0	21,89	26,78	21,89	27,41	

При вычислении КИН учитывалось реальное соотношение полуосей полуэллиптических поверхностных трещин в однородном поле напряжений и в области сварных швов. Теоретические коэффициенты концентрации напряжений α_σ определялись экспериментально. Остаточные поверхностные сварочные напряжения принято на уровне $\sigma_{ry} = 0,5\sigma_{0,2}^{O,M}$ (до 0,15t) [9].

Полученные значения коэффициентов интенсивности напряжений существенно уточняют число циклов нагружения на стадии роста усталостных трещин, определяемых по формуле (1).

Таблица 2

Сравнение значений КИН для образцов с поверхностной трещиной, развивающейся в однородном поле напряжений и в зоне сварных соединений

Образцы	$\sigma_n/\sigma_{0,2}$	a, мм	c, мм	a/t	$K_{1,A}^*$	$K_{1,B}^*$	$K_{1,A}^* + \alpha \cdot K_{r,A}$	$K_{1,B}^* + \alpha \cdot K_{r,B}$
					МПа $\sqrt{м}$			
Образцы с $\alpha_\sigma = 1$	0,45 ($\sigma_n = 168$ МПа)	2	2,86	0,1	10,51	9,72	–	–
		3	4,30	0,15	12,96	12,06	–	–
Образцы с приваренной накладкой ($\alpha_\sigma = 1,9$)	0,45 ($\sigma_n = 168$ МПа)	1	1,39	0,05	11,30	12,88	11,80	14,32
		2,0	2,86	0,1	14,14	18,47	14,77	20,53
		3,0	4,30	0,15	15,85	22,92	16,55	25,49
		3,0	20,0**	0,15	20,09	19,51	20,98	21,70

Примечания:

* – без учета остаточных растягивающих сварных напряжений;

** – при слиянии трещин.

ВЫВОДЫ

Получены расчетно-экспериментальные данные по оценке КИН для поверхностных полуэллиптических трещин, развивающихся в однородном поле напряжений и в зоне сварных соединений. Данные свидетельствуют, что в результате наложения (суперпозиции) остаточных растягивающих, локальных и рабочих напряжений, значения КИН существенно увеличиваются. Указанный эффект является наиболее существенным для точек поверхностной трещины, расположенных на поверхности и приповерхностной области зоны сплавления шва с основным металлом, и снижается при распространении поверхностной трещины вглубь элемента.

Проведенные исследования свидетельствуют, что в полях локальных конструктивных и остаточных напряжений растяжения увеличиваются абсолютные значения скоростей роста поверхностных трещин, в результате чего изменяется кинетика формы поверхностной трещины. При этом прослеживается тенденция к изменению контура трещины в процессе циклического нагружения таким образом, чтобы во всех точках фронта поверхностной трещины КИН были одинаковыми (образовывается энергетически стабильная форма трещины).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints // IIW Doc.XIII-1539-96/XV-845-96. – 117 p.
2. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В. И. Махненко. – К. : Наук. думка, 2006. – 620 с.
3. Копельман Л. А. Основы теории прочности сварных конструкций / Л. А. Копельман. – СПб. : Лань, 2010. – 464 с.
4. Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов / В. В. Панасюк. – К. : Наук. думка, 1991. – 416 с.
5. Мураками Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / Ю. Мураками. – М. : Мир, 1990. – Т. 1, Т. 2. – 1016 с.
6. Hobbacher A. Stress intensity factors of welded joints / A. Hobbacher // Eng. Fract.Mechanics. – 1993. – V.46. – № 2. – P. 173–182.
7. Підгурський М. І. Аналіз закономірностей поширення втомних поверхневих тріщин в елементах зварних конструкцій / М. І. Підгурський // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2009. – № 3 (406). – С. 83–89.
8. Труфяков В. И. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / В. И. Труфяков. – К. : Наук. думка, 1990. – 256 с.
9. Карзов Г. П. Физико-механическое моделирование процессов разрушения / Г. П. Карзов, Б. З. Марголин, В. А. Швецова. – Санкт-Петербург : Политехника, 1993. – 391 с.